СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА





Научная статья

УДК 625.7/.8

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-104-114

Динамический отклик слоистых сред на ударное нагружение (на примере автомобильных дорог)

А.Н. Тиратурян ✉, **А.В. Воробьев**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ tiraturjan@list.ru

Аннотация
Введение. Основным способом оценки несущей способности дорожных конструкций (представляющих собой слоистую среду, состоящую из материалов разной жесткости) является испытание установками ударного нагружения. Анализ результатов этих испытаний сводится к рассмотрению только пиковых значений вертикальных перемещений без учета изменения этих параметров в частотном и временном диапазоне. Вместе с тем именно изучение амплитудно-частотных характеристик перемещений может позволить решить ряд актуальных проблем, связанных, например, с приведением фактических значений вертикальных перемещений к значениям при проектных режимах работы конструкции.
Целью исследования является анализ динамического отклика слоистых сред (дорожных конструкций) автомобильных дорог на ударное нагружение, направленный на приведение фактических параметров динамического отклика к проектным значениям, регламентируемым требованиями отечественных нормативных документов по проектированию дорог.
Материалы и методы. Современные установки ударного нагружения позволяют воспроизводить нагрузку со временем импульса 0,03 с, в то время как проектные значения модулей упругости рассчитаны для 0,1 с. Для преодоления этого противоречия авторами было реализовано точное решение динамического уравнения Ламе для многослойного полупространства, и построен ряд амплитудно-частотных характеристик перемещений, на основе обработки которых была выведена упрощенная функциональная зависимость.
Результаты исследования. Разработана методика построения амплитудно-частотных характеристик перемещений на поверхности дорожной одежды при ударном воздействии, которая находит свое практические применение. На основе точного решения динамического уравнения Ламе путем статистической обработки установлена упрощенная регрессионная зависимость для приведения вертикальных перемещений. Представлен пример расчета модулей упругости слоев дорожной конструкции с учетом их приведения в зависимости от времени приложения нагрузки.
Обсуждение и заключения. В рамках исследования впервые получена методика приведения фактических значений вертикальных перемещений к значениям при проектных режимах работы дорожной конструкции, целиком базирующаяся на расчетном анализе ее динамического НДС, в частности, амплитудно-частотной характеристике деформирования при нестационарном воздействии. Разработанный подход способен значительно повысить достоверность диагностики состояния автомобильных дорог, а также обеспечить единство измерений и результатов, получаемых при проектировании и диагностике дорог.

Ключевые слова: асфальтобетонные покрытия, механические свойства, долговечность, обратный расчет, численная модель, чаша прогиба

Для цитирования. Тиратурян А.Н., Воробьев А.В. Динамический отклик слоистых сред на ударное нагружение (на примере автомобильных дорог). *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):104–114. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-104-114

Original article

Dynamic Response of the Layered Mediums to the Impact Load (on the Example of Motorways)

Artem N. Tiraturyan ✉, **Andrey V. Vorobiev**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ tiraturjan@list.ru

Abstract

Introduction. The main way to assess the load-bearing capacity of the road structures (which represent the layered mediums consisting of the materials of different rigidity) is by testing them with the impact loading test facilities. The analysis of the results of such tests reveals that they focus only on studying the peak values of vertical movements without taking into account changes of these parameters in frequency or time. However, it is the study of amplitude-frequency specifications of movements that can enable solving a number of pressing problems, e.g., related to bringing the actual values of vertical movements to the values of design mode operation of the structure. The aim of the present research is to analyse the dynamic response of the motorway layered mediums (road structures) to the impact load in order to bring the actual parameters of the dynamic response to the design parameters, which comply with the requirements of the national regulatory documents on road design.

Materials and Methods. The modern impact loading test facilities make it possible to simulate the impact pulse duration of 0.03s, while the design values of the elasticity moduli equal to 0.1s. To overcome this discrepancy, the authors have implemented the precise solution of the dynamic Lame equation for a multilayered half-space and have drawn up a number of amplitude-frequency specifications of movements, which have been processed and have become a basis for deriving a simple functional dependency.

Results. The methodology of drawing up the amplitude-frequency specifications of the movements on the road pavement surface, subject to impact action, has been developed and implemented in practice. Based on the precise solution of the dynamic Lame equation, by using the statistical processing, a simple regression dependency for calculating the vertical movements has been determined. An example of the elastic moduli calculation of the road structure layers, taking into account their dependency on the load application time, has been presented.

Discussion and Conclusion. Within the framework of the research, for the first time, a methodology has been developed for bringing the actual values of vertical movements to the values of design mode operation of the road structure based entirely on the computational analysis of its dynamic stress-strain state (SSS), in particular, the amplitude-frequency specification of deformation under the non-stationary impact. The developed approach contributes significantly to increasing the credibility of the motorway condition diagnostics, as well as ensures the integrity of measurements and results obtained during the road design and diagnostics.

Keywords: asphalt concrete pavements, mechanical properties, durability, back-calculation, numerical model, deflection bowl

For citation. Tiraturyan AN, Vorobiev AV. Dynamic Response of the Layered Mediums to the Impact Load (on the Example of Motorways). *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2023;2(4):104–114. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-104-114

Введение. Одной из важнейших задач оценки прочности эксплуатируемых дорожных одежд на автомобильных дорогах является корректный учет температуры и времени нагружения. Общеизвестно, что основным критерием, определяющим прочность дорожной одежды, является ее расчет на допускаемый упругий прогиб. На этапе проектирования модули упругости слоев асфальтобетона назначаются для расчетной температуры 10 °С и времени воздействия колеса расчетного автомобиля — 0,1 с. В условиях эксплуатации, когда осуществляется измерение прочности, фактическая температура и время воздействия от различных установок динамического нагружения могут существенно отличаться от этих нормативных значений, что несомненно вносит вклад в точность и достоверность результатов измерений.

Однако необходимо констатировать, что в последние годы исследований, касающихся учета влияния температуры на свойства асфальтобетона, проведено крайне мало. Можно отметить исследования [1–3], позволившие

установить, что зависимость, связывающая общий модуль упругости дорожной одежды и температуру поверхности ее покрытия, имеет логарифмический характер и принимает следующий вид:

$$E = k \times lnT + B \quad (1)$$

где T — температура связных слоев, °C; k, B — эмпирические коэффициенты.

Коэффициенты k, B в свою очередь зависят от толщины связных слоев дорожной одежды. Помимо вышеуказанных исследований рекомендации по приведению модуля упругости асфальтобетонов к нормативным параметрам присутствуют в документе СТО АВТОДОР 10.1-2013 «Определение модулей упругости слоев эксплуатируемых дорожных конструкций с использованием установки ударного нагружения». В данном документе приводятся рекомендуемые коэффициенты перехода от модуля упругости асфальтобетона, замеренного при фактической температуре на поверхности покрытия и времени приложения нагрузки t = 0,03 с, к нормативной температуре 10 °C и времени воздействия колеса расчетного автомобиля — 0,1 с.

В зарубежной практике следует констатировать более широкий набор исследований, затрагивающих данную проблему. Так в исследованиях [4–6] указано, что модули упругости асфальтобетона, определенные в ходе натурных испытаний при фактической температуре, следует приводить к 20 °C либо к 25 °C. Механизм приведения в этих исследованиях также базируется на применении регрессионных зависимостей, связывающих модули упругости слоя с их температурой в диапазоне, как правило, от 0 до 40 °C.

В работах [7–10] отмечается влияние времени приложения нагрузки на значение модуля упругости слоев асфальтобетона. Отмечается, что с увеличением времени приложения нагрузки снижается модуль упругости слоев асфальтобетона. В основе самого алгоритма приведения в представленных работах лежит соотнесение динамического модуля упругости, зарегистрированного при частоте приложения нагрузки установки ударного нагружения FWD, с мастер-кривыми динамического модуля упругости асфальтобетонных образцов, отобранных из покрытия в точке ударного воздействия. В работе [11] приводятся сводные данные о принимаемых в различных источниках стандартных значениях частоты нагружения, воспроизводимой установками ударного нагружения FWD (таблица 1).

Таблица 1

Данные о частоте нагружения установкой ударного нагружения FWD, принимаемые различными авторами

Место исследований	Источник	Репрезентативная частота нагрузки FWD, Гц	Частотно-временное преобразование	Тип FWD
MnROAD	Clyne, et al., 2004	17,9	частота нагрузки определяется по временным данным тензометрического датчика	Dynatest
Virginia Tech Transportation Institute	Loulizi, et al., 2007	5,3	f=1/2πt	Dynatest
Kansas State University	Gedafa, et al., 2010	25	f=1/t	Dynatest
CEDEX	Mateos, et al., 2012	15	f=1/t	KUAB
Applied Research Associates, Inc. (ARA)	Ayyala, et al., 2017	30	f=1/t	Dynatest

Как видно из представленной таблицы в исследованиях, выполненных на полигоне MnRoad, а также в исследовательских организациях Kansas State University, CEDEX реализуется единый подход к определению частоты от приложения нагрузки установки ударного нагружения FWD, напрямую связывающий время импульса со временем. Различие в значениях частоты можно связать с разным расчетным временем импульса воздействия установки ударного нагружения. Иной подход применен в Virginia Tech Transportation Institute. В соответствии с [12] авторами было установлено наличие сдвига на величину 1/2π по оси частот, что и отражено в приведенной расчетной формуле.

Таким образом, очевидна малая изученность вопроса выполнения временной и температурной корректировки результатов измерений модулей упругости в условиях эксплуатации в практике РФ и серьезная разрозненность применяемых подходов в международной практике. Это позволяет сделать вывод об актуальности изучения механизмов приведения значений модулей упругости слоев асфальтобетона по частоте и температуре к нормативным значениям.

Материалы и методы. При проведении исследований была использована математическая модель динамического напряженно-деформированного состояния многослойного полупространства. Данная модель базируется на решениях, полученных в трудах [13–19]. Подробно постановка задачи и определяющие соотношения, реализуемые в математической модели, описаны в [20]. В рамках поставленной в данном исследовании задачи

анализируется динамическое напряженно-деформированное состояние многослойного полупространства под воздействием ударной нагрузки, распределенной по круговому отпечатку. Деформирование среды описывается системой уравнений Ламе. Решение этих уравнений осуществляется с использованием преобразования Ханкеля в виде:

$$\mathbf{U}^{(j,N)}(\mathbf{R},\omega)=\int_{\Gamma_+} J_k(uR)\sum_{n=1}^{2}\mathbf{P}^{(j,n)}(u,z)\cdot\overline{\mathbf{X}}^{(j,n)}(u)udu \tag{2}$$

где J_k — функция Бесселя; $\boldsymbol{P}^{(j,n)}$ — ядро интегрального представления для многослойного полупространства; $\overline{\mathbf{X}}^{(j,n)}$ — преобразования Ханкеля для напряжения на границах слоев (n = 1, 2), определяемых из граничных условий.

Ядра интегрального преобразования для случая однородного полупространства имеют вид матриц-функций $\boldsymbol{P}^{(1)}(u,z)$:

$$\mathbf{P}^{(1)}(u,z)=\mathbf{D}(u,z)\cdot\mathbf{B}^{-1}(u,0), \tag{3}$$

$$\mathbf{D}(u,z)=\begin{pmatrix}-u\exp(\sigma_{11}z) & -\sigma_{12}\exp(\sigma_{12}z)\\ \sigma_{11}\exp(\sigma_{11}z) & u\exp(\sigma_{12}z)\end{pmatrix}, \tag{4}$$

$$\mathbf{B}^{-1}(u,0)=\begin{pmatrix}\zeta_2^2 & 2u\sigma_{21}\\ -2u\sigma_{11} & -\zeta_2^2\end{pmatrix}\Delta_R^{-1},\ \Delta_R=\zeta_2^4-4u^2\sigma_{11}\sigma_{12},\ \varsigma_2^2=u^2+\sigma_{12}^2 \tag{5}$$

Преобразование Фурье от импульса $\bar{\boldsymbol{X}}^{(1)}(u)$ для однородного полупространства в форме преобразования Ханкеля имеет вид:

$$\overline{\mathbf{X}}^{(1)}(u)=\sigma_0 P(\omega)\frac{J_1(uR_0)}{u} \tag{6}$$

где σ_0 — давление на поверхность покрытия от воздействия установки ударного нагружения, Па; $P(\omega)$ — спектр нагружения.

Вывод представлений $\boldsymbol{P}^{(j,n)}$, $\overline{\boldsymbol{X}}^{(j,n)}$ для многослойного полупространства осуществляется с применением рекуррентных зависимостей, опирающихся на условие равенства перемещений на границах контакта слоев многослойного полупространства. Общий вид зависимостей представлен в [21]. Применение интегрального преобразования Ханкеля позволяет осуществить построение амплитудно-частотной характеристики перемещений в любой точке исследуемой среды. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) при этом имеет вид, представленный на рис. 1.

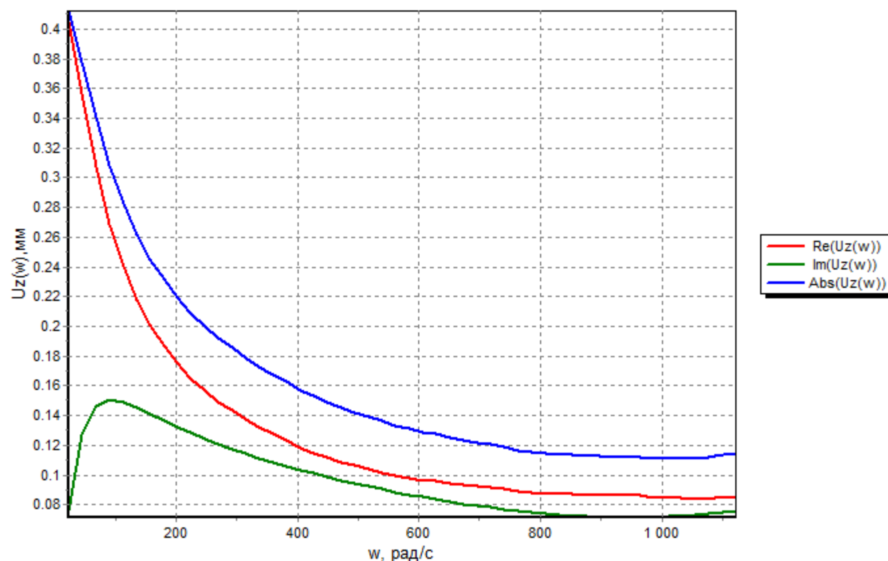


Рис. 1. АЧХ перемещений на поверхности многослойного полупространства:
Uz(w), мм — вертикальные перемещения; w, рад/с — круговая частота

Строительная механика

Данный график построен для нагрузки величиной 700 кПа и времени приложения 0,03 с. Частотная область, в которой отслеживаются колебания поверхности покрытия, находится в диапазоне от 0 до 1500 рад/с (от 0 до 238 Гц соответственно). Вертикальные перемещения изменяются в диапазоне от 0,43 мм при ω_0 = 0 рад/с (что соответствует статике) до 0,115 мм при ω_k = 1500 рад/с. Таким образом, в зависимости от частоты приложения нагрузки упругий прогиб изменяется в 3,74 раза. Для изучения влияния динамичности нагружения на величину вертикальных упругих деформаций был выполнен численный эксперимент для трех вариантов дорожных конструкций, отличающихся толщиной пакета асфальтобетонных слоев. Исследуемые конструктивы дорожных одежд и расчетные параметры представлены в таблице 2.

Таблица 2

Входные данные для моделирования

Конструкция дорожной одежды	Толщина слоев, см	Модуль упругости, МПа/ коэффициент Пуассона	Коэффициент демпфирования
Асфальтобетон	10–30	2000/0,35	0,08
Основание, не обработанное вяжущим	40	200/0,35	
Грунт земляного полотна	–	41/0,35	

Модуль упругости слоя асфальтобетона принимался в виде средневзвешенного значения, коэффициент демпфирования слоя асфальтобетона задавался в соответствии с [22]. Результаты моделирования представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты моделирования амплитудно-частотной характеристики деформирования на поверхности покрытия

Конструкция 1					Конструкция 2					Конструкция 3				
F	*h*	*l*	*w*	$K_{пер}$	*F*	*h*	*l*	*w*	$K_{пер}$	*F*	*h*	*l*	*w*	$K_{пер}$
0	10	0	0,562	1,070476	0	20	0	0,59	1,432039	0	30	0	0,48	1,142857
		30	0,5	1,106195			30	0,462	1,121359			30	0,385	1,166667
		60	0,395	1,09116			60	0,362	1,113846			60	0,32	1,185185
		120	0,255	1,20283			120	0,248	1,169811			120	0,235	1,236842
		180	0,175	1,129032			180	0,175	1,166667			180	0,17	1,214286
10		0	0,525	1	10		0	0,53	1,286408	10		0	0,42	1
		30	0,452	1			30	0,412	1			30	0,33	1
		60	0,362	1			60	0,325	1			60	0,27	1
		120	0,212	1			120	0,212	1			120	0,19	1
		180	0,155	1			180	0,15	1			180	0,14	1
25		0	0,42	0,8	25		0	0,412	1	25		0	0,3	0,714286
		30	0,355	0,785398			30	0,305	0,740291			30	0,23	0,69697
		60	0,251	0,69337			60	0,23	0,707692			60	0,18	0,666667
		120	0,151	0,712264			120	0,12	0,566038			120	0,12	0,631579
		180	0,11	0,709677			180	0,095	0,633333			180	0,08	0,571429
50		0	0,3	0,571429	50		0	0,305	0,740291	50		0	0,215	0,511905
		30	0,25	0,553097			30	0,205	0,497573			30	0,145	0,439394
		60	0,175	0,483425			60	0,145	0,446154			60	0,11	0,407407
		120	0,095	0,448113			120	0,08	0,377358			120	0,065	0,342105
		180	0,062	0,4			180	0,05	0,333333			180	0,04	0,285714
100		0	0,21	0,4	100		0	0,212	0,514563	100		0	0,14	0,333333
		30	0,162	0,358407			30	0,0125	0,03034			30	0,085	0,257576
		60	0,1	0,276243			60	0,075	0,230769			60	0,06	0,222222
		120	0,05	0,235849			120	0,04	0,188679			120	0,03	0,157895
		180	0,037	0,23871			180	0,025	0,166667			180	0,02	0,142857
180		0	0,162	0,308571	180		0	0,152	0,368932	180		0	0,11	0,261905
		30	0,11	0,243363			30	0,075	0,182039			30	0,05	0,151515
		60	0,06	0,165746			60	0,048	0,147692			60	0,03	0,111111
		120	0,047	0,221698			120	0,25	1,179245			120	0,02	0,105263
		180	0	0			180	0	0			180	0	0

Моделирование осуществлялось для набора частот 0, 10, 25, 50, 100, 180 Гц и для точек наблюдения, находящихся на расстоянии от точки приложения нагрузки (l) — 0, 30, 60, 120, 180 см. В качестве стандартной частоты принималась частота 10 Гц, и для нее же считался коэффициент перехода $K_{пер}$. По итогам статистической обработки полученных результатов была построена корреляционная зависимость *K (f, l, h)* между коэффициентом перехода от фактической частоты нагружения к расчетной частоте 10 Гц, имеющая следующий вид:

$$K(f,l,h) = 1{,}305738 - 0{,}014451f + 0{,}000052f^2 - 0{,}066578\ln(h) - 0{,}000467l \quad (7)$$

где f — частота колебаний, Гц; h — толщина пакета слоев асфальтобетона; l — расстояние от точки ударного нагружения.

Статистическая обработка осуществлялась в программном комплексе Statistica. Коэффициент детерминации данной зависимости составил R2 = 0,97. Расчет и приведение вертикального перемещения к нормативной частоте и времени нагружения осуществляется по формуле:

$$U_{норм} = U_{f=25Гц} \times K(f,l,h) \quad (8)$$

Результаты исследования. В качестве примера реализации полученной зависимости был осуществлен расчет и приведение к расчетной частоте чаши прогибов и модулей упругости слоев дорожной одежды на эксплуатируемом участке автомобильной дороги М1 «Беларусь».

Конструкция дорожной одежды, для которой осуществлялся расчет, представлена в таблице 4.

Таблица 4

Конструкция дорожной одежды, принимаемая при моделировании

Слой	Толщина, см	Проектное значение модуля упругости, МПа
Асфальтобетон	19	2500
Основание	33	200
Дополнительный слой основания	50	120
Грунт земляного полотна		41

Фактическая чаша прогибов, зарегистрированная при фактическом времени контактного воздействия 0,04 с (что соответствует 25 Гц), и чаша прогибов, откорректированная в соответствии с зависимостью (7), представлены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты моделирования амплитудно-частотной характеристики деформирования на поверхности покрытия

Параметр	Датчик 1 (0)	Датчик 1 (200)	Датчик 1 (300)	Датчик 1 (600)	Датчик 1 (900)	Датчик 1 (1200)	Датчик 1 (1500)	Датчик 1 (1800)	Датчик 1 (2100)
Прогиб, мм, при частоте 25 Гц	0,380	0,326	0,291	0,245	0,210	0,145	0,102	0,072	0,053
Коэффициент перехода по частоте $K(f,l,h)$	0,781	0,772	0,767	0,753	0,739	0,725	0,711	0,697	0,683
Прогиб, мм, при частоте 10 Гц	0,487	0,423	0,379	0,325	0,284	0,200	0,143	0,103	0,078

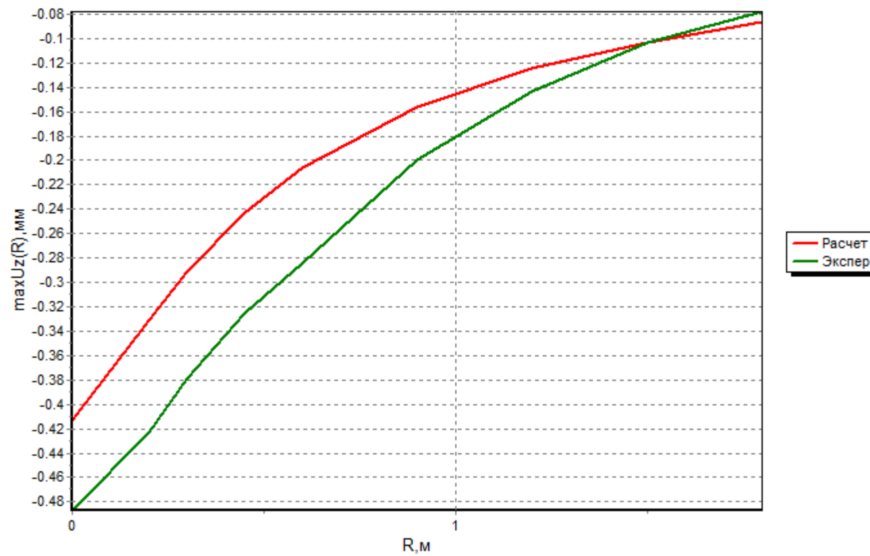


Рис. 2. Расчетная и экспериментальная чаша прогибов до корректировки

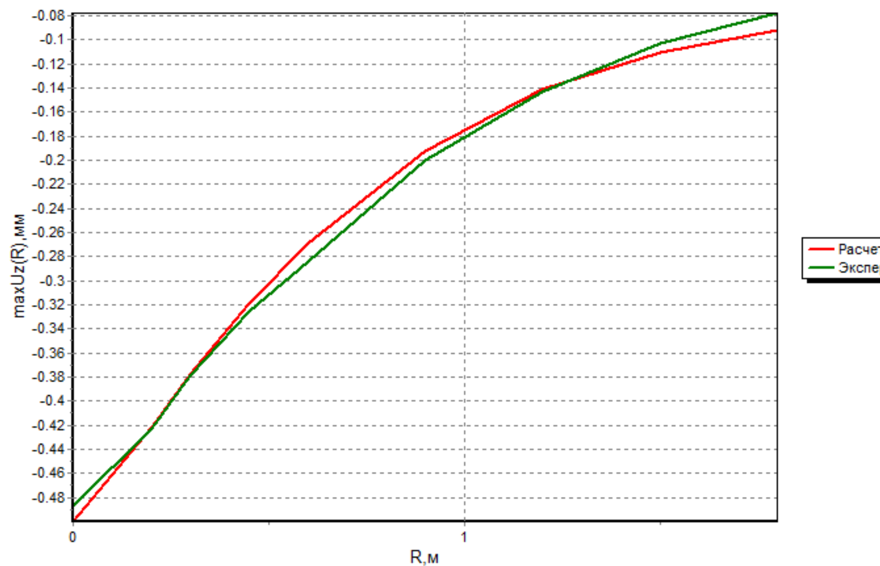


Рис. 3. Расчетная и экспериментальная чаша прогибов после корректировки

Таблица 6

Результаты определения модулей упругости конструктивных слоев дорожных одежд от фактического времени приложения нагрузки

Слой	Откорректированные модули (t = 0,03 с)	Откорректированные модули (t = 0,1 с)
Асфальтобетон	3200	3014
Основание	348	190
Дополнительный слой основания	62	55
Грунт земляного полотна	170	95

Как видно из таблицы 2, приведение модулей упругости слоев дорожной одежды по времени в соответствии с полученными зависимостями затрагивает все материалы конструктивных слоев, так как для многослойной системы изменение жесткости отдельных слоев влечет за собой изменения в форме АЧХ перемещений, что прослеживается в данных, представленных в таблице 1. Полученная зависимость позволяет осуществить расчет

общего модуля упругости на поверхности дорожной конструкции для времени приложения нагрузки t = 0,03 с, и t = 0,1 с. В этом случае общий модуль упругости рассчитывается как:

$$E_{общ} = \frac{pD(1-\mu^2)}{d_0}, \quad (9)$$

где $E_{ОБЩ}$ — общий модуль упругости на поверхности дорожной конструкции, МПа; p — давление, кПа; D — диаметр отпечатка, м; μ — коэффициент Пуассона; d_0 — упругий прогиб в центре приложения нагрузки, мм.

В этом случае значение общего модуля упругости при времени воздействия t = 0,03 с составит 575 МПа, а значение общего модуля упругости при времени воздействия t = 0,1 с — 449 МПа. Подобное приведение необходимо, когда речь идет о сопоставлении фактического общего модуля упругости с проектным значением, определенным по нормативным документам.

Обсуждение и заключения. Разработана методика построения амплитудно-частотных характеристик перемещений на поверхности дорожной конструкции при ударном воздействии.

Выполнено численное моделирование изменения амплитудно-частотной характеристики перемещений на поверхности дорожной конструкции для различных сочетаний толщины асфальтобетонных слоев, расстояния от точки ударного воздействия и частоты колебаний.

На основе точного решения динамического уравнения Ламе путем статической обработки установлена упрощенная регрессионная зависимость для приведения вертикальных перемещений, зарегистрированных при частоте 25 Гц (соответствующей частоте нагружения установки FWD), к нормативному времени нагружения 0.1 с (соответствующему нормативным документам). Коэффициент детерминации составил R2 = 0,97.

Представлен пример расчета модулей упругости слоев дорожной конструкции с учетом их приведения в зависимости от времени приложения нагрузки. Установлено, что при приведении модулей упругости слоев дорожной одежды от 25 Гц к 10 Гц происходит их снижение, проявляющееся для всех материалов слоев.

Список литературы

1. Кузнецов Ю.В., Мордвин С.С., Макаров Е.Н., Криушин П.А. Проблемы оценки прочности современных дорожных одежд. *Наука и техника в дорожной отрасли.* 2017;(2):37–40.

2. Мордвин С.С. Влияние температуры дорожной одежды на величину динамического прогиба. *Наука и техника в дорожной отрасли.* 2010;(2):31–34.

3. Кузнецов Ю.В., Мордвин С.С. Оценка прочности дорожной одежды динамическим нагружением. *Транспортное строительство.* 2010;(2):15–17.

4. Pratelli C., Betti G., Giuffrè T., Marradi A. Preliminary In-Situ Evaluation of an Innovative, Semi-Flexible Pavement Wearing Course Mixture Using Fast Falling Weight Deflectometer. *Materials.* 2018;11(4):611. https://doi.org/10.3390/ma11040611

5. Manosalvas-Paredes M., Navarro Comes A., Francesconi M., Khosravifar S., Ullidtz P. Fast Falling Weight Deflectometer (FastFWD) for Accelerated Pavement Testing (APT). In book: *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, 1st edition. London: CRC Press; 2017. 394 p. https://doi.org/10.1201/9781315100333

6. Chou C.P., Lin Y.C., Chen A.C. Temperature Adjustment for Light Weight Deflectometer Application of Evaluating Asphalt Pavement Structural Bearing Capacity. *Transportation Research Record.* 2017;2641(1):75–82. https://doi.org/10.3141/2641-10

7. Damnjanovic I., Zhang Z. Determination of Required Falling Weight Deflectometer Testing Frequency for Pavement Structural Evaluation at the Network Level. *Journal of Transportation Engineering.* 2006;132(1). https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:1(76)

8. Deng Y., Luo X., Zhang Y., Lytton R. Determination of Complex Modulus Gradients of Flexible Pavements Using Falling Weight Deflectometer and Artificial Intelligence. *Materials and Structures.* 2020;53(4):100. https://doi.org/10.1002/stc.2671

9. Khan Z.H., Tarefder R.A., Hasan M.A. Field Characterization of Pavement Materials Using Falling Weight Deflectometer and Sensor Data from an Instrumented Pavement Section. *Transportation Research Record*. 2020;2674(4):036119812091192. https://doi.org/10.1177/0361198120911926

10. Ingrassia L.P., Cardone F., Ferrotti G., Canestrari F. Monitoring the Evolution of the Structural Properties of Warm Recycled Pavements with Falling Weight Deflectometer and Laboratory Tests. *Road Materials and Pavement Design.* 2021;22(1):S69-S82. http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2021.1906302

11. Bech N. *Use of Falling Weight Deflectometer Testing in the Pavement ME AC/AC Overlay Design Procedure.* Master's Thesis. University of Pittsburgh; 2018. 375 p.

12. Sullivan B., Rickards I., Yousefdoost S. Interconversion of Laboratory Measured Modulus Results to Feld Modulus and Strain. In: *Proceedings of the AAPA International Flexible Pavements Conference*. Brisbane; 2013.

13. Ворович И.И., Бабешко В.А., Пряхина О.Д. *Динамика массивных тел и резонансные явления в деформируемых средах.* Москва: Научный мир; 1999. 220 с.

14. Бабешко В.А., Глушков Е.В., Зинченко Ж.Ф. *Динамика неоднородных линейно-упругих сред.* Москва: Наука; 1989. 344 с.

15. Илиополов С.К., Селезнев М.Г., Углова Е.В. *Динамика дорожных конструкций.* Монография. Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского государственного строительного университета; 2002. 258 с.

16. Grundmann H., Lieb M., Trommer E. The Response of a Layered Half-space to Traffic Loads Moving Along its Surface. *Archive of Applied Mechanics.* 1999;69:55–67. https://doi.org/10.1007/s004190050204

17. Xu Q., Prozzi J.A. A Time-domain Finite Element Method for Dynamic Viscoelastic Solution of Layered-half-space Responses under Loading Pulses. *Computers and Structures.* 2015;160:20–39. http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.07.005

18. Schanz M. Poroelastodynamics: Linear Models, Analytical Solutions, and Numerical Methods. *Applied Mechanics Reviews.* 2009;62(3):030803. http://dx.doi.org/10.1115/1.3090831

19. Углова Е.В., Тиратурян А.Н., Ляпин А.А. Комплексный подход к исследованию характеристик динамического деформирования на поверхности нежестких дорожных одежд с использованием методов неразрушающего контроля. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика.* 2016;(2):111–130. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.2.08

20. Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Nikolenko D.A., Nikolenko M.A. Model for Determining the Elastic Moduli of Road Pavement layers. *Magazine of Civil Engineering.* 2021;(3):10308. https://doi.org/10.34910/MCE.103.8

21. Lyapin A.A., Parinov I.A., Buravchuk N.I., Cherpakov A.V., Shilyaeva O.V., Guryanova O.V. *Improving Road Pavement Characteristics: Applications of Industrial Waste and Finite Element Modelling.* Cham: Springer Nature; 2020. 236 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59230-1

22. Uglova E., Tiraturyan A. Calculation of the Damping Factors of the Flexible Pavement Structure Courses According to the In-place Testing Data. *Procedia Engineering.* 2017;187:742–748. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.431

References

1. Kuznetsov YuV, Mordvin SS, Makarov YeN, Kriushin PA. Problems of Strength Assessment of Modern Road Pavements. *Science and Engineering for Roads.* 2017;(2):37–40. (In Russ.).

2. Mordvin SS. Influence of Road Pavement Temperature on the Dynamic Deflection Value. *Science and Engineering for Roads.* 2010;(2):31–34. (In Russ.).

3. Kuznetsov JV, Mordvin SS. Estimation of Road Pavement Durability by Dynamic Loading. *Transport Construction.* 2010;(2):15–17. (In Russ.).

4. Pratelli C, Betti G, Giuffrè T, Marradi A. Preliminary In-Situ Evaluation of an Innovative, Semi-Flexible Pavement Wearing Course Mixture Using Fast Falling Weight Deflectometer. *Materials.* 2018;11(4):611. https://doi.org/10.3390/ma11040611

5. Manosalvas-Paredes M, Navarro Comes A, Francesconi M, Khosravifar S, Ullidtz P. Fast Falling Weight Deflectometer (FastFWD) for Accelerated Pavement Testing (APT). In book: *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, 1st edition. London: CRC Press; 2017. 394 p. https://doi.org/10.1201/9781315100333

6. Chou CP, Lin YC, Chen AC. Temperature Adjustment for Light Weight Deflectometer Application of Evaluating Asphalt Pavement Structural Bearing Capacity. *Transportation Research Record.* 2017;2641(1):75–82. https://doi.org/10.3141/2641-10

7. Damnjanovic I, Zhang Z. Determination of Required Falling Weight Deflectometer Testing Frequency for Pavement Structural Evaluation at the Network Level. *Journal of Transportation Engineering.* 2006;132(1). https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:1(76)

8. Deng Y, Luo X, Zhang Y, Lytton R. Determination of Complex Modulus Gradients of Flexible Pavements Using Falling Weight Deflectometer and Artificial Intelligence. *Materials and Structures.* 2020;53(4):100. https://doi.org/10.1002/stc.2671

9. Khan ZH, Tarefder RA, Hasan MA. Field Characterization of Pavement Materials Using Falling Weight Deflectometer and Sensor Data from an Instrumented Pavement Section. *Transportation Research Record*. 2020;2674(4):036119812091192. https://doi.org/10.1177/0361198120911926

10. Ingrassia LP, Cardone F, Ferrotti G, Canestrari F. Monitoring the Evolution of the Structural Properties of Warm Recycled Pavements with Falling Weight Deflectometer and Laboratory Tests. *Road Materials and Pavement Design.* 2021;22(1):S69-S82. http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2021.1906302

11. Bech N. *Use of Falling Weight Deflectometer Testing in the Pavement ME AC/AC Overlay Design Procedure.* Master's Thesis. University of Pittsburgh; 2018. 375 p.

12. Sullivan B, Rickards I, Yousefdoost S. Interconversion of Laboratory Measured Modulus Results to Feld Modulus and Strain. In: *Proceedings of the AAPA International Flexible Pavements Conference*. Brisbane; 2013.

13. Vorovich II, Babeshko VA, Pryahina OD. *Dynamics of Massive Bodies and Resonant Phenomena in Deformable Medium.* Moscow: Nauchnyj mir; 1999. 220 p. (In Russ.).

14. Babeshko VA, Glushkov EV, Zinchenko ZF. *Dynamics of Non-homogeneous Linear-Elastic Medium. Moscow*: Nauka; 1989. 344 p. (In Russ.).

15. Iliopolov SK, Seleznev MG, Uglova EV. *Dynamics of Road Structures.* Monograph. Rostov-on-Don: Rostov State University of Civil Engineering; 2002. 258 p. (In Russ.).

16. Grundmann H, Lieb M, Trommer E. The Response of a Layered Half-space to Traffic Loads Moving Along its Surface. *Archive of Applied Mechanics.* 1999;69:55–67. https://doi.org/10.1007/s004190050204

17. Xu Q, Prozzi JA. A Time-domain Finite Element Method for Dynamic Viscoelastic Solution of Layered-half-space Responses under Loading Pulses. *Computers and Structures.* 2015;160:20–39. http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.07.005

18. Schanz M. Poroelastodynamics: Linear Models, Analytical Solutions, and Numerical Methods. *Applied Mechanics Reviews.* 2009;62(3):030803. http://dx.doi.org/10.1115/1.3090831

19. Uglova EV, Tiraturyan AN, Lyapin AA. Integrated Approach to Studying Characteristics of Dynamic Deformation on Flexible Pavement Surface Using Nondestructive Testing. *PNRPU (Perm National Research Polytechnic University) Mechanics Bulletin.* 2016;(2):111–130. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.2.08 (In Russ.).

20. Tiraturyan AN, Uglova EV, Nikolenko DA, Nikolenko MA. Model for Determining the Elastic Moduli of Road Pavement Layers. *Magazine of Civil Engineering.* 2021;(3):10308. https://doi.org/10.34910/MCE.103.8

21. Lyapin AA, Parinov IA, Buravchuk NI, Cherpakov AV, Shilyaeva OV, Guryanova OV. *Improving Road Pavement Characteristics: Applications of Industrial Waste and Finite Element Modelling.* Cham: Springer Nature; 2020. 236 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59230-1

22. Uglova E, Tiraturyan A. Calculation of the Damping Factors of the Flexible Pavement Structure Courses According to the In-place Testing Data. *Procedia Engineering.* 2017;187:742–748. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.431

Поступила в редакцию 24.09.2023
Поступила после рецензирования 13.10.2023
Принята к публикации 19.10.2023

Об авторах:

Тиратурян Артем Николаевич, профессор кафедры «Автомобильные дороги» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, доцент, ScopusID, ORCID, tiraturjan@list.ru

Воробьев Андрей Викторович, инженер кафедры «Автомобильные дороги» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, andreyvorobyev19@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А.Н. Тиратурян — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, научное руководство, анализ результатов исследований, формирование выводов.

А.В. Воробьев — подготовка текста, доработка текста, формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 24.09.2023
Revised 13.10.2023
Accepted 19.10.2023

About the Authors:

Artem N. Tiraturyan, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Motorways Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, ORCID, tiraturjan@list.ru

Andrey V. Vorobiev, Engineer of the Motorways Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, andreyvorobyev19@mail.ru

Claimed contributorship:

Tiraturyan AN — formulating the main concept, aim and objectives of the research, carrying out calculations, scientific supervision, analysis of the research results, formulating the conclusions.

Vorobiev AV — preparing the text, refining the text, formulating the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.